

УДК 621.182

Комплексонатная водоподготовка в малых водооборотных системах охлаждения

Канд. техн. наук **О. А. ПИНЧУК**^{1,2}, канд. физ.-мат. наук **А. Ф. КОСТКО**¹,
канд. хим. наук **С. В. КАРАВАН**¹

¹Университет ИТМО

²Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева

E-mail: oapinchuk@yandex.ru

В работе обсуждается определение водно-химического режима в водооборотных системах охлаждения с малыми объемами циркулирующей воды. Предотвращение солеотложений, в первую очередь на теплообменных поверхностях, и снижение коррозии конструкционных материалов достигались за счет использования фосфорорганических кислот (комплексон) и/или их солей (комплексонатов). Представлены результаты определения максимальной жесткости оборотной воды и дозы ингибитора солеотложений (по органическому фосфору). Приведены результаты контроля жесткости циркулирующей воды в двух водооборотных системах охлаждения при коррекционной обработке в течение длительного периода времени. Анализ результатов показал, что для стабильной работы водооборотных систем охлаждения необходимо контролировать коэффициент упаривания. При запуске системы или после продувки необходимо устанавливать минимальный коэффициент упаривания. В процессе эксплуатации водооборотных систем охлаждения период времени, когда достигается максимальный коэффициент упаривания, должен быть растянут. Комплексонатная водоподготовка увеличивает концентрационный предел солесодержания в циркулирующей воде, то есть позволяет длительное время эксплуатировать водооборотные системы охлаждения при высоком солесодержании. Периодическая продувка необходима при недостаточном капельном уносе оборотной воды, снижающем солесодержание.

Ключевые слова: водооборотные системы охлаждения, карбонатная жесткость, комплексоны, комплексонаты.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 24.05.2020, принята к печати 09.07.2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-3-3-9

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Пинчук О. А., Костко А. Ф., Караван С. В. Комплексонатная водоподготовка в малых водооборотных системах охлаждения // Вестник Международной академии холода. 2020. № 3. С. 3–9.

Complexonate water treatment in small water circulation cooling systems

Ph. D. **O. A. PINCHUK**^{1,2}, Ph. D. **A. F. KOSTKO**¹, Ph. D. **S. V. KARAVAN**¹

¹ITMO University

²D. I. Mendeleyev Institute for Metrology VNIIM

E-mail: oapinchuk@yandex.ru

The paper discusses the water-chemical regime in water-circulation cooling systems with low volumes of circulating water. Salt deposition prevention, primarily on heat exchange surfaces, and corrosion reduction of structural materials were achieved with organophosphoric acids (complexons) and/or their salts (complexonates). The maximum hardness of recycled water and the dose of the salt deposition inhibitor (for organic phosphorus) are presented. As an example, the monitoring data of the circulating water hardness in two water-circulation cooling units during corrective treatment for a long period of time are given. The data analysis showed that the operation stability of water circulation cooling systems requires the evaporation coefficient control. Minimum evaporation coefficient should be achieved at starting the system or after purging. The period of time when the maximum of evaporation coefficient is reached should be extended. Complexonate water treatment increases the concentration limit of salinity in circulating water and allows long-term operation of water circulation cooling systems with high salinity. Periodic purging is required if there is insufficient drip entrainment of circulating water, which reduces the salt content.

Keywords: water circulation cooling systems, carbonate hardness, complexons, complexonates.

Article info:

Received 24/05/2020, accepted 09/07/2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-3-3-9

Article in Russian

For citation:Pinchuk O. A., Kostko A. F., Karavan S. V. Complexonate water treatment in small water circulation cooling systems. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2020. No 3. p. 3–9.**Введение**

Системы водяного охлаждения используются практически во всех отраслях промышленности и являются неотъемлемой частью технологического процесса. Использование воды в водооборотном цикле в качестве теплоносителя повышает производственные затраты. На тепловых электростанциях, нефтеперерабатывающих, химических и других крупных производствах, как правило, применяются открытые водооборотные системы охлаждения (ВСО) с градирнями и с большими объемами циркулирующей воды. Для снижения объема циркулирующей воды в ряде случаев целесообразно единую заводскую систему охлаждения разбить на отдельные ВСО с меньшими объемами циркулирующей воды [1, 2] (например, от 5 до 100 м³), которые обслуживают отдельные объекты. Целесообразность такой замены определяется многими факторами и в первую очередь тем, что различные участки единой ВСО могут располагаться на большом расстоянии. В таких небольших системах охлаждения часто применяют вместо градирен оросительные конденсаторы. Независимо от конструкции ВСО, проблемы контроля водно-химического режима в каждой системе остаются и их решение зависит не только от природы подпиточной воды, но и от особенностей самой системы охлаждения.

В процессе эксплуатации ВСО возникают сложности, обусловленные отложениями малорастворимых солей жесткости, продуктов коррозии и биоотложениями на внутренних поверхностях используемого оборудования. Солеотложения возникают не только в случае использования минерализованных природных вод, но и в случае многократного использования ограниченных объемов воды, которая изначально имела низкую жесткость. Отложение солей на стенках аппаратов и трубопроводов в ВСО приводит к ухудшению работы теплообменного оборудования и, как следствие, к уменьшению энергетической эффективности и срока его эксплуатации. Кроме того, отложение солей на внутренних поверхностях трубопроводов приводит к сужению внутреннего диаметра труб и уменьшению потока циркулирующей по ним воды. Увеличивается нагрузка на насосы для подачи необходимого для охлаждения количества воды. Так, например, в работах [2, 3] показано, что загрязнение теплообменных поверхностей может приводить к существенному повышению энергопотребления систем охлаждения, что увеличивает производственные потери.

Коррозия металлов и солеотложения могут приводить не только к снижению мощности теплоэнергетического оборудования, но и к аварийным остановкам ВСО. Кроме того, может происходить перерасход воды, как жесткой так и мягкой, характеризующейся повышенной коррозионной активностью. Процессы коррозии метал-

лических частей ВСО, их скорость и характер, зависят от многих факторов и в первую очередь от условий эксплуатации оборудования, химического состава, как оборотной воды, так и металла, тепловых нагрузок на теплообменники. Фактически к аварийным ситуациям может привести упаривание теплоносителя на поверхностях нагрева с выделением твердой фазы и образованием в этих местах зон повышенной коррозионной активности.

К традиционным методам водоподготовки относятся Na-катионирование, фосфатирование неорганическими полифосфатами и другие. В работах [1, 4, 5] проанализированы достоинства и недостатки этих методов и показано, что они имеют ограниченную область применения, в основном на крупных предприятиях.

Предложенные для ВСО физические методы (магнитные, акустические и другие) защиты от солеотложений [1, 6] не способны защитить от солеотложений трубопроводы, градирни, каналы, бассейны. В них будут накапливаться солеотложения и биообрастания. Также они не защищают от коррозии металлические конструкции, находящиеся в контакте с водой.

Для защиты всей ВСО от солеотложений и коррозии широко используются химические методы, суть которых заключается в том, что в циркулирующую (или подпитывающую) воду добавляются ингибиторы солеотложений и коррозии, а также биоциды [1, 3–5]. Фосфорорганические кислоты (комплексоны) и/или их соли (комплексонаты) по мнению многих авторов [1, 7–13] считаются наиболее эффективными ингибиторами солеотложений и коррозии. К достоинствам комплексонатов относятся их низкая токсичность и достаточно быстрое разложение [1, 2, 14]. Ингибирование процесса солеотложений с помощью комплексонатов и/или комплексонатов основано на пороговом эффекте, суть которого заключается в том, что комплексоны, содержащиеся в пересыщенных растворах солей жесткости, в очень низкой концентрации способны задерживать выделение твердой фазы [1, 4]. При этом комплексоны и/или комплексонаты могут снижать в несколько раз интенсивность коррозии стали в оборотной воде [1, 4, 5, 14]. Ряд авторов [3, 15] объясняют антикоррозионное действие этих веществ образованием на поверхности металла защитной пленки из гидроксидов металлов и комплексонатов и/или комплексонатов. Эти вещества при низких концентрациях, обычно используемых на практике, являются нетоксичными и для некоторых из них разработаны ПДК [16].

Цель работы заключается в том, чтобы показать практический пример эксплуатации малых ВСО, включая рекомендации по проведению лабораторных исследований оборотной воды, на основании которых определялся водно-химический режим.

Результаты и обсуждение

Работы по комплексонатной водоподготовке проводились на предприятии, на котором единая заводская система охлаждения заменена несколькими ВОС, обслуживающими отдельные объекты. Это позволило снизить расход воды, учитывать конструктивные особенности различных ВСО, их условия эксплуатации и требования, предъявляемые к оборотной воде.

Важными задачами эксплуатации ВСО считаются предотвращение солеотложений, в первую очередь на теплообменных поверхностях, и снижение коррозии конструкционных материалов. Эти задачи решались за счёт использования фосфорорганических кислот (комплексонов) и/или их солей (комплексонатов). Принципиальное отличие водоподготовки с использованием комплексонов и комплексонатов (комплексонатная водоподготовка) от других методов водоподготовки заключается в том, что все соли и вещества не удаляются, а остаются в оборотной воде. Оседают только небольшие частицы продуктов коррозии. Поэтому, когда содержание солей жесткости в оборотной воде достигнет предельного значения, которое определяется экспериментально на этапе пуско-наладки необходимо проводить замену воды, то есть периодическую продувку.

При внедрении комплексонатной водоподготовки необходимо учитывать свойства как циркулирующей, так и подпиточной воды. Экспериментально должны быть определены следующие показатели: жесткость, pH, щелочность, а также присутствие посторонних примесей, таких как нефтепродукты, аммиак, кислоты, соли и др. Проведённые исследования позволяют обоснованно выбирать состав и оптимальные концентрации реагентов для конкретной ВСО. Необходимо учитывать конструктивные особенности, тепловой и гидродинамический режимы самой системы. В некоторых ВСО в циркулирующую воду возможно попадание отработанной технической или очищенной сточной воды. В этом случае необходим более строгий контроль циркулирующей воды (более частый отбор проб циркулирующей воды и лабораторная проверка показателей качества) и, в случае необходимости, соответствующая корректировка концентрации ингибиторов.

В работах [17, 18] рекомендуются методики типового расчета водно-химического режима. Однако, представленные методы расчета имеют ограниченное применение, так как учитывают наличие в оборотной воде только электролитов и не учитывают наличие в циркулирующей воде различных органических веществ и микрофлоры. Поэтому такие расчеты являются оценочными. С целью выбора композиции реагентов и их концентраций необходимо проводить лабораторное исследование циркулирующей воды и воды подпитки. В случаях возможного изменения состава воды подпитки, например в период паводков, необходим более тщательный контроль циркулирующей и подпиточной вод, и при необходимости, корректировка доз реагентов.

Эффективность эксплуатации открытых ВСО существенно зависит от соблюдения оптимального водно-химического режима, который характеризуется коэффициентом упаривания K

$$K = \frac{V_{\text{подп}}}{V_{\text{ц}} + D}, \quad (1)$$

где $V_{\text{подп}}$ — объем подпиточной воды, м³/ч; $V_{\text{ц}}$ — объем циркулирующей воды, м³/ч; D — суммарные потери воды, м³/ч. Суммарные потери воды складывается из объема воды $V_{\text{ун}}$, определяемого уносом водяных капель, и объема воды $V_{\text{прод}}$, определяемого продувкой и возможными другими потерями (паразитные или неконтролируемые утечки и т. д.). Таким образом, D определяется следующим образом

$$D = V_{\text{ун}} + V_{\text{прод}}. \quad (2)$$

В производственной практике обычно пользуются другим соотношением для определения D

$$D = \frac{V_{\text{исп}}}{K - 1}, \quad (3)$$

где $V_{\text{исп}}$ — объем испарившейся в ВСО воды, м³/ч. Соотношение (3) справедливо, если количество растворимых солей в системе не изменяется [1, 13]. В реальных ВСО возможны высокие тепловые нагрузки, приводящие к значительному испарению воды, поэтому соотношение (3) может нарушаться.

В работе [1] рекомендуется для экономии воды поддерживать наибольший коэффициент упаривания за счет уменьшения объема продувки. С другой стороны, этому же условию, как видно из соотношения (1), будет соответствовать наибольший расход воды подпитки.

Коэффициент упаривания может быть определен через концентрации хлорид ионов

$$K = \frac{C_{\text{ц}}}{C_{\text{подп}}}, \quad (4)$$

где $C_{\text{ц}}$ и $C_{\text{подп}}$ — концентрации хлоридов в циркулирующей воде и в воде подпитки, соответственно, г/м³. Однако расчет коэффициента упаривания через концентрации хлоридов может быть неточным [12], так как возможны поступления хлоридов с подпиточной водой или из воздуха рабочей зоны возможно попадание различных веществ, влияющих на растворимость хлоридов в воде. Следовательно, чтобы определять коэффициент упаривания для какой-либо конкретной ВСО по соотношению (4), необходимо сначала убедиться в его применимости, выполнив соответствующие исследования циркулирующей и подпиточной вод в лабораторных условиях. Различия в значениях K , полученных по соотношениям (1) и (4) может достигать 40%, поэтому в некоторых случаях вводят поправочный коэффициент в соотношении (4).

При подборе доз реагентов в лабораторных условиях удобно использовать коэффициент упаривания, выраженный через жесткость воды до и после упаривания ($K_{\text{ж}}$)

$$K_{\text{ж}} = \frac{Ж}{Ж_0}, \quad (5)$$

где $Ж_0$ и $Ж$ — жесткость воды до и после упаривания, соответственно.

Подбор доз (концентраций) реагентов, которые были бы достаточными для стабилизирующего действия, проводился при проведении пуско-наладочных работ и регулярно в процессе эксплуатации ВСО. Важно про-

водить проверку доз при замене реагентов. В работе [1] показано, что в водооборотных системах охлаждения в Северо-Западном регионе коэффициенты упаривания часто не превышают значений $K=5$. Для каждой ВСО проводилась серия исследований для подбора диапазона оптимальных концентраций реагентов. Использовался подход, описанный в работе [1]. В пять емкостей помещалось одинаковое количество подпиточной или оборотной воды и добавлялись различные дозы реагентов. Объем воды упаривался в 5 раз для получения коэффициента упаривания $K=5$. Упаривание проводилось в диапазоне температур от 60 до 80 °С, чтобы избежать потери реагентов при разбрызгивания воды в процессе упаривания. Определялась жесткость воды до и после выпаривания.

Для оценки эффективности различных доз реагентов рассчитывался процент предотвращения солеотложений (a , %)

$$a = \frac{Ж \cdot 100}{Ж_0 \cdot K} \quad (6)$$

Случаю полного предотвращения солеотложений соответствуют равенства

$$K = K_{ж}, \quad Ж = KЖ_0 \quad (7)$$

Однако в реальных условиях добиться полной защиты ВСО от солеотложений не всегда возможно. Учитывая, что объем циркулирующей воды в ВСО может изменяться, на практике выбирался диапазон доз реагентов, в котором процент предотвращения солеотложений изменялся от 80% до 100%. В процессе эксплуатации ВСО один раз в неделю проводился контроль концентрации комплексонов и/или комплексонатов по содержанию органического фосфора (как разность между концентрациями общего и неорганического фосфора, по PO_4^{4-}). Исходя из результатов выполненных лабораторных исследований, определялось количество реагентов, которые необходимо добавлять в ВСО.

В последние годы широкое распространение получили готовые к дозированию реагенты с различными торговыми названиями [3, 19], включающие не только комплексоны, но и другие вещества (поверхностно-активные вещества, ингибиторы коррозии и др.). При этом чаще всего в них используют составы реагентов (смесей ингибиторов), обладающие синергическим эффектом. В этом случае, получается лучший результат при меньшей дозировке реагентов. В сопроводительных документах на реагенты обычно указывается концентрация действующего вещества. Однако практика нашей работы и работы на других предприятиях [4], показывает, что содержание действующего вещества часто меняется от партии к партии. Для более точного дозирования реагентов, при использовании готовых композиций предварительно проводилась проверка концентрации по действующему веществу (органическому фосфору). В работе использовались готовые композиции, такие как «Акварезалт», «АКВА-ИС 1», «АКВА-ИС 1/2».

Следует отметить, что фосфорорганические комплексоны и/или комплексонаты, являются ингибиторами не только солеотложений, но и коррозии. При этом

нужно иметь в виду, что продукты их разложения в некоторых случаях могут провоцировать рост биообрастаний. Для предотвращения биоотложений и биообрастаний в ВСО обычно добавлялись биоциды, в основном в летнее время, как это описано в работах [1, 13].

Предварительно методом лабораторного тестирования оборотной воды устанавливалась оптимальная для предотвращения солеотложений концентрация комплексона с целью его дозирования в оборотную воду. Также в лаборатории определялась предельная жесткость оборотной воды (от 7 до 10 ммоль/дм³) при которой не происходит выпадение солей жесткости для выбранной концентрации комплексонов. Ежедневно проводился контроль воды в ВСО по следующим показателям: pH, жесткость, щелочность, концентрации органического и неорганического фосфора (в форме ортофосфат-иона). Исходя, из результатов анализов принимались решения о количестве комплексона, которое необходимо добавлять в систему и о необходимости замены воды в ВСО, в случае, если жесткость воды приближалась к предельному значению.

Максимальный коэффициент упаривания (K_{max}) определяется для случая, когда в циркулирующей воде соле-содержание максимально и в то же время обеспечивается полное предотвращение солеотложений, а коррозия металлов должна находиться в допустимых пределах. При проведении пуско-наладочных работ новой ВСО или при запуске после полной отмывки ВСО бывшей в эксплуатации устанавливался минимальный коэффициент упаривания (K_{min}).

В качестве примера комплексонатной водоподготовки двух ВСО на рис. 1 и 2 приведены результаты контроля жесткости оборотной воды при коррекционной обработке. В ВСО, находящихся в Санкт-Петербурге, как правило, в качестве добавочной используется водопроводная вода, которая в течение года имеет практически постоянную жесткость, изменяющуюся в диапазоне от 0,7 до 0,9 ммоль/дм³. Использовался ингибитор коррозии и солеотложений «АКВА-ИС 1/2», изготовленный по ТУ 2439-005-75095515-2007. Предварительно определялась концентрация органического фосфора в исходном реагенте. Для воды этих ВСО выбран диапазон концентраций ингибитора солеотложений, который соответствует допустимому изменению концентрации органического фосфора от 1,0 до 2,5 мг/дм³. Помимо ингибитора коррозии и солеотложения в воду добавлялись поверхностно-активное вещество (ОП-10) и биоцид (в летний период). Ежедневно проводился анализ оборотной воды по следующим показателям: pH, щелочность, жесткость, содержание органического и неорганического фосфора (в форме ортофосфат-иона). Концентрация органического фосфора в оборотной воде поддерживалась в допустимом диапазоне (от 1,0 до 2,5 мг/дм³). Контролировалась также коррозионная активность воды. Коррозия металлических конструкций, контактирующих с водой, не наблюдалась в обеих системах.

В первой ВСО объем циркулирующей воды составлял около 5 м³, а во второй — около 20 м³. Установленное в лаборатории предельное значение жесткости, когда отсутствует выпадение солей жесткости, составляло 10 ммоль/дм³.

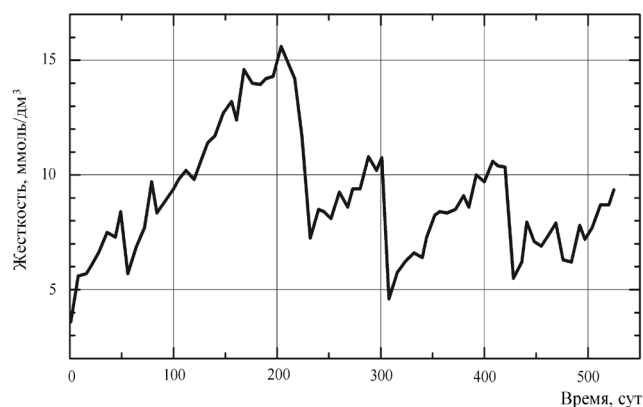


Рис. 1. Жесткость циркулирующей воды в первой ВСО при коррекционной обработке

Fig. 1. Circulating water hardness in the first water-circulation cooling system under correction treatment

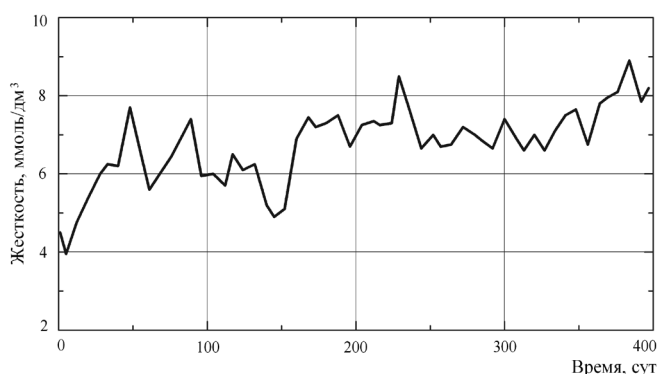


Рис. 2. Жесткость циркулирующей воды во второй ВСО при коррекционной обработке

Fig. 2. Circulating water hardness in the second water-circulation cooling system under correction treatment

Как видно из рис. 1, в первой ВСО из-за большой тепловой нагрузки максимальное рекомендованное значение жесткости 10 ммоль/дм^3 было достигнуто уже на 120 день. Однако своевременно заменить воду в системе не удалось, поэтому ВСО продолжала эксплуатироваться без замены оборотной воды и жесткость воды продолжала увеличиваться. В данной ситуации результаты измерения жесткости сравнивались с предыдущими результатами, и контролировалась скорость увеличения жесткости. На 214 день жесткость оборотной воды достигла $15,6 \text{ ммоль/дм}^3$. В связи с тем, что объем воды в системе существенно понизился, была проведена подпитка системы и на 232 день жесткость понизилась до $7,3 \text{ ммоль/дм}^3$. Режим работы ВСО не изменился, поэтому жесткость продолжала расти фактически так же быстро. На 301 день, когда она составляла $10,8 \text{ ммоль/дм}^3$, была проведена замена воды в системе и ее очистка. Одновременно с заменой воды проводилось внесение реагентов. В работе [1] показано, что при более высоких концентрациях комплексоны и/или комплексонаты способны растворять отложения солей жесткости. В оборотную воду было добавлено повышенное содержание комплексона, которое составляло около 3 ммоль/дм^3 , так как нельзя исключить выпадение солей жесткости на теплообменных поверхностях за период работы ВСО, когда жесткость в системе превышала предельное значение. Поэтому результаты измерения жесткости на 308 день оказались завышенными, и жесткость составляла $4,6 \text{ ммоль/дм}^3$. В дальнейшем продувка проводилась приблизительно через 100 сут, в зависимости от производственной необходимости, что обеспечило стабильную работу и полную защиту оборудования ВСО от солеотложений и коррозии. В данной системе коэффициент упаривания возрастал быстро, и при сохранении режима работы необходимо было часто проводить продувку.

Во второй ВСО объем циркулирующей воды составлял около 20 м^3 . Как видно из рис. 2, капельный унос циркулирующей воды из градирни из-за малой тепловой нагрузки обеспечил стабильную работу ВСО в течение длительного времени без продувок. Коэффициент упаривания

возрастал медленно. Следует отметить, что из визуальных наблюдений было видно, что оборотная вода на этом объекте не содержала никаких дополнительных примесей.

Сопоставление работы двух ВСО показывает, что конструкция первой ВСО не является оптимальной, так как в ней не учитываются возможные большие тепловые нагрузки. Большая стабильность работы этой ВСО могла бы быть достигнута при увеличении объема циркулирующей воды. Однако при проектировании ВСО всегда следует учитывать стоимость воды, реагентов и наличие площади для размещения оборудования.

Таким образом, если применяется комплексонатная водоподготовка, то для рациональной эксплуатации ВСО, когда обеспечивается энергетическая эффективность системы охлаждения, с одной стороны, и экономия воды с другой, необходимо определить оптимальный интервал значений коэффициента упаривания от K_{\min} до K_{\max} . Водно-химический режим в ВСО следует устанавливать с K_{\min} . В процессе эксплуатации ВСО коэффициент упаривания будет возрастать, при этом продувка должна быть минимальной. Необходимо стремиться к увеличению времени, за которое будет достигнуто K_{\max} . Достигнув этой величины, следует провести продувку до K_{\min} .

В ряде работ, например в работе [1], указывалось на возможность достижения стабилизирующего действия комплексонов даже при высокой жесткости воды. Для проверки стабилизирующего действия комплексонов, были отобраны пробы воды с высокой жесткостью J_1 в пластиковые флаконы, вместимостью $0,5 \text{ дм}^3$. Пробы выдерживались в условиях лаборатории более пяти месяцев, а затем снова определялась жесткость J_2 . Результаты представлены в табл. 1. Жесткость воды после выдерживания в лабораторных условиях изменилась незначительно. Как видно из рис. 1 и табл. 1 стабилизирующее действие комплексонов может проявляться и при высокой жесткости, однако это состояние системы нельзя считать стабильным. При незначительных изменениях в ней может произойти выпадение большого количества солей жесткости, что приведет к повреждению оборудования.

Таблица 1

Результаты контроля жесткости оборотной воды в первой ВСО

Table 1

The results for circulating water hardness in the first water-circulation cooling system

Номер пробы	Дата отбора пробы	Жесткость J_1 , ммоль/дм ³	Дата повторного анализа	Жесткость J_2 , ммоль/дм ³
1	25.09.17	13,3	22.02.18	13,1
2	19.07.17	9,00	22.02.18	8,7

Заключение

В работе обсуждается определение водно-химического режима в ВСО с малыми объемами циркулирующей воды. Предотвращение солеотложений, в первую очередь на теплообменных поверхностях, и снижение коррозии конструкционных материалов достигались за счет использования фосфорорганических кислот (комплексонатов) и/или их солей (комплексонатов). Представлены методы определения коэффициента упаривания, а также результаты определения максимальной жесткости оборотной воды и дозы ингибитора солеотложений (по органическому фосфору).

В качестве примера приведены результаты контроля жесткости циркулирующей воды в двух ВСО при коррекционной обработке воды в течение длительного периода времени. Анализ полученных результатов показал, что для стабильной работы ВСО необходимо контроли-

ровать коэффициент упаривания. При запуске системы или после продувки необходимо устанавливать K_{\min} . В процессе эксплуатации ВСО доводить до K_{\max} следует за длительный промежуток времени.

Комплексонатная водоподготовка увеличивает концентрационный предел солесодержания в циркулирующей воде, то есть позволяет длительное время эксплуатировать водооборотные системы охлаждения при высоком солесодержании. Периодическая продувка необходима при недостаточном капельном уносе оборотной воды, снижающем солесодержание.

В настоящее время производится много современных смесей реагентов для предотвращения солеотложений и снижения коррозии в ВСО, поэтому целесообразно в дальнейшем разработать алгоритм подбора реагентов для увеличения максимального значения коэффициента упаривания.

Литература

References

1. Терентьев В. И., Караван С. В., Пинчук О. А., Караван Д. В. Ресурсосберегающие технологии эксплуатации оборотных систем охлаждения. СПб.: Проспект Науки, 2016. 206 с.
2. Бурдыгина Е. В., Костарева С. Н., Трофимов А. Ю., Федосеева Е. А., Дунюшкин Г. К. Эффективность оборудования систем оборотного водоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка. 2019. № 4. С. 11–15.
3. Дрикер Б. Н., Мурашова А. И., Тарантаев А. Г. Ингибиторы многоцелевого назначения // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 6. С. 21–24.
4. Ковалёва Н. Е., Рудакова Г. Я. Теория и практика применения комплексонатов для очистки воды // Новости теплоснабжения. 2002. № 8. С. 43–45.
5. Юрченко В. Г., Тарасова Н. А. Опыт внедрения комплексонатной водоподготовки в районных котельных ОАО «Алметьевские тепловые сети» // Новости теплоснабжения. 2013. № 11. С. 45–46.
6. Мосин О. В. Аппараты магнитной обработки воды // Новости теплоснабжения. 2012. № 11. С. 42–47.
7. Drzyzga D., Lipok J. Analytical insight into degradation processes of aminopolyphosphonates as potential factors that induce cyanobacterial blooms // Environ Sci Pollut Res. 2017. V. 24. P. 24364–24375.
8. Kadirov B. M., Ergasheva S. K., Kodirov K. E. Research of the efficiency of complex inhibitors of salt deposition, corrosion and biofouling // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2018. № 9–10. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/research-of-the-efficiency-of-complex-inhibitors-of-salt-deposition-corrosion-and-biofouling>.
1. Terentyev V. I., Caravan S. V., Pinchuk O. A., Caravan D. V. Resource-saving technologies for operating circulating cooling systems. SPb.: Prospect Nauki, 2016. 200 p. (in Russian)
2. Burdygina E. V., Kostareva S. N., Trofimov A. Y., Dunyushkin G. K., Fedoseeva E. A. Energy efficiency of equipment of water recycling systems. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2019. No 4. P. 11–15. (in Russian)
3. Driker B. N., Murashova A. I., Tarantaev A. G. Inhibitors multifunction destination. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2017. No 6. P. 21–24. (in Russian)
4. Kovaleva N. E., Rudakova G. Ya. Theory and practice of using complexones for water treatment. *Heat Supply News*. 2002. No. 8. P. 43–45. (in Russian)
5. Yurchenko V. G., Tarasova N. A. Experience in the implementation of complexon water treatment in district boiler houses of Almet'yevsk Heating Networks OJSC. *Heat Supply News*. 2013. No. 11. P. 45–46. (in Russian)
6. Mosin O. V. Magnetic Water Treatment Devices. *Heat Supply News*. 2012. No. 11. P. 42–47. (in Russian)
7. Drzyzga D., Lipok J. Analytical insight into degradation processes of aminopolyphosphonates as potential factors that induce cyanobacterial blooms. *Environ Sci Pollut Res*. 2017. V. 24. P. 24364–24375.
8. Kadirov B. M., Ergasheva S. K., Kodirov K. E. Research of the efficiency of complex inhibitors of salt deposition, corrosion and biofouling. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2018. No 9–10. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/research-of-the-efficiency-of-complex-inhibitors-of-salt-deposition-corrosion-and-biofouling>.

9. Ji Y., Chena Y., Le J., Qian M., Huan Y., Yang W., Yin X., Liu Y., Wang X., Chen Y. Highly effective scale inhibition performance of amino trimethylenephosphonic acid on calcium carbonate // *Desalination*. 2017. V. 422. P. 165–173.
10. Pech-Canul M. A., Echeverria M. Corrosion inhibition of steel in neutral chloride solutions by mixtures of N-phosphonomethylglycine with zinc ions // *Corrosion Engineering, Science and Technology*. 2003 V. 38:2. P. 135–138.
11. Zhao X. D., Yang J., Fan X. Q. Review on Research and Progress of Corrosion Inhibitors // *Applied Mechanics and Materials*. 2010. V. 44–47. P. 4063–4066.
12. Маргулова Т. Х. Применение комплексонов в теплоэнергетике. М.: Энергия, 1986. 280 с.
13. Кабачник М. И., Дятлова Н. М. Фосфорсодержащие комплексоны. М.: Знание, 1989. 29 с.
14. Рудакова Г. Я., Кугушев А. А. Применение фосфонатов для стабилизационной обработки воды в системах теплоснабжения // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2008. № 6. С. 8–11.
15. Кузнецов Ю. И., Зинченко Г. В., Казанский Л. П., Андреева Н. П., Макарычев Ю. В. О пассивации железа в водных растворах 1-гидроксиэтан-1,1-дифосфоната цинка // *Коррозия: материалы, защита*. 2006. № 9. С. 19–26.
16. ГН 2.1.5.2280–07 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Дополнения и изменения N 1 к ГН 2.1.5.1315–03 [Электронный ресурс]: <https://files.stroyinf.ru/Data1/51/51955/>
17. РД 34.22.503–89 СО 153–34.22.503–89 Методические указания по стабилизационной обработке охлаждающей воды в оборотных системах охлаждения с градиентами оксидирующей среды // *Электронный ресурс*: <https://docplan.ru/Data2/1/4294817/4294817310.htm>
18. РД 34.37.514–91 Методические указания по комплексоновой обработке воды барабанных котлов под давлением 40–100 кгс/см² (3,9–9,8 МПа) [Электронный ресурс]: // <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294817/4294817944.htm>.
19. Гусева О. В., Бутакова М. В., Губин Д. В., Орлов К. А. Опыт внедрения коррекционного водно-химического режима на ГТУ-ТЭС с использованием реагента АМИНАТ // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2019. № 2. С. 16–20.
9. Ji Y., Chena Y., Le J., Qian M., Huan Y., Yang W., Yin X., Liu Y., Wang X., Chen Y. Highly effective scale inhibition performance of amino trimethylenephosphonic acid on calcium carbonate. *Desalination*. 2017. V. 422. P. 165–173.
10. Pech-Canul M. A., Echeverria M. Corrosion inhibition of steel in neutral chloride solutions by mixtures of N-phosphonomethylglycine with zinc ions. *Corrosion Engineering, Science and Technology*. 2003 V. 38:2. P. 135–138.
11. Zhao X. D., Yang J., Fan X. Q. Review on Research and Progress of Corrosion Inhibitors. *Applied Mechanics and Materials*. 2010. V. 44–47. P. 4063–4066.
12. Margulova T. Kh. Application of complexons in heat power engineering. Moscow, Energoatomizdat. 1986. 280 p. (in Russian)
13. Kabachnik M. I., Dyatlova N. M. Organophosphorus complexones. Moscow, Znanie. 1989. 29 p. (in Russian)
14. Rudakova G. Ya., Kugushev A. A. Application of phosphonates for stabilization treatment of water in heat supply systems. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2008. No 6. P. 8–11. (in Russian)
15. Kuznetsov Yu. I., Zinchenko G. V., Kazan L. P., Andreeva N. P., Makarychev Yu. B. On Passivation of Iron in Aqueous Solutions of Zinc 1-hydroxyethane-1,1-diphosphonate. *Corrosion: materials, protection*. 2006. No. 9. P. 19–26. (in Russian)
16. GN 2.1.5.2280–07 Maximum allowable concentration (MPC) chemicals in water bodies of water drinking and cultural water use. Additions and changes N 1 to GN 2.1.5.1315–03. [Electronic resource]: <https://files.stroyinf.ru/Data1/51/51955/>. (in Russian)
17. RD 34.22.503–89 Methodological instructions for stabilization processing cooling water in circular cooling systems with oxyethylenediphosphonic acid. [Electronic resource]: <https://docplan.ru/Data2/1/4294817/4294817310.htm>. (in Russian)
18. RD 34.37.514–91 Methodical instructions for complex treatment of drum boiler water with pressure of 40–100 kgf/cm² (3,9–9,8 MPa). [Electronic resource]: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294817/4294817944.htm>. (in Russian)
19. Guseva O. V., Butakova M. V., Gubin D. V., Orlov K. A. The experience of implementing the water chemistry treatment on the gas-turbine power plant using the AMINAT reagents. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2019. No 2. P. 16–20. (in Russian)

Сведения об авторах

Пинчук Ольга Афанасьевна

К. т. н., доцент, старший преподаватель факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9. Ведущий научный сотрудник ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 190005, Санкт-Петербург, Московский пр., 19, oapinchuk@yandex.ru
ORCID 0000-0002-0841-4713

Костко Андрей Федорович

К. ф.-м. н., доцент, преподаватель физико-технического факультета Университета ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, afkostko@yahoo.com,
ORCID 0000-0002-7023-107X

Караван Светлана Васильевна

К. т. н., доцент, ORCID 0000-0002-4571-1311

Information about authors

Pinchuk Olga A.

Ph. D., Associate professor, Senior lecturer of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9. Leading researcher of VNIIM named after D. I. Mendeleev, 190005, Saint Petersburg, Moskovsky Ave., 19, oapinchuk@yandex.ru,
ORCID 0000-0002-0841-4713

Kostko Andrey F.

Ph. D., Associate professor, Teacher of the Faculty of Physics and Technology of ITMO University Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia, afkostko@yahoo.com,
ORCID 0000-0002-7023-107X

Karavan Svetlana V.

Ph. D., Associate professor, ORCID 0000-0002-4571-1311